中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 276−286

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160671

朱开伟, 刘贞, 欧训民, 贺良萍, 林金钗. 基于土壤功能的中国主要农作物可能源化秸秆生态潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 276−286
Zhu K W, Liu Z, Ou X M, He L P, Lin J C. Evaluation of energy-oriented utilization potential of main Chinese crop residues based on soil protection functions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 276−286

基于土壤功能的中国主要农作物可能源化秸秆生态潜力分析*

朱开伟[1], 刘 贞[1,2**], 欧训民[3], 贺良萍[1], 林金钗[1]

(1. 重庆理工大学低碳能源研究中心 重庆 400054; 2. 美国劳伦斯国家能源实验室 美国加州 94530; 3. 清华大学能源环境经济研究所/中国车用能源研究中心 北京 100084)

摘 要: 秸秆生态还田对我国生态农业的发展以及秸秆能源化的可持续发展有着重要的意义。据此, 从防止水土流失、维持土壤有机质和长期作物产量的角度, 提出了土壤生态保留量的概念, 并设计了不同农作物秸秆的 3 种生态保留量情景(低情景、中情景和高情景); 综合运用灰色神经网络、线性回归等方法对上述因素进行预测, 构建了自下而上的动态评价模型, 对中国各区域可能源化秸秆资源的生态潜力进行评价分析, 并提出了相关发展建议。研究发现: ①在低、中、高农作物秸秆生态保留量情景中, 2030 年可能源化秸秆生态总量分别为 22 796 万 t、13 718 万 t 和 7 756 万 t, 秸秆资源密度分别约为 172 t·km^{-2}、103 t·km^{-2} 和 58 t·km^{-2}; 在秸秆资源构成方面, 低、中情景均以稻谷、薯类、小麦秸秆为主, 而高情景则以薯类和甘蔗秸秆为主; 3 种情景中, 可能源化秸秆资源均主要分布在河南、山东、黑龙江、四川等地。②在低情景中, 仅北京、天津、上海和西藏不能发展直燃发电项目和燃料乙醇项目; 中情景中, 年产 5 万 t 燃料乙醇项目仅适合规划在福建、广东、广西、海南和重庆; 高情景中, 仅福建、广东、广西、海南和重庆可规划 25 MW 直燃发电项目或年产 5 万 t 的燃料乙醇项目。

关键词: 土壤生态保留量; 秸秆能源化; 生物质能; 秸秆资源; 生态潜力
中图分类号: P964; S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)02-0276-11

Evaluation of energy-oriented utilization potential of main Chinese crop residues based on soil protection functions*

ZHU Kaiwei[1], LIU Zhen[1,2**], OU Xunmin[3], HE Liangping[1], LIN Jinchai[1]

(1. Low Carbon Energy Research Center, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Lawrence Berkeley National Laboratory, California 94530, USA; 3. Institute of Energy, Environment and Economy / China Automotive Energy Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The return of crop residue to soils can prevent soil and water erosion, maintain soil organic matter and plant nutrient balance, etc. Meanwhile, the utilization of crop residue energy can relieve energy stress and improve energy structure in China.

* 国家自然科学基金(71573026)和重庆市研究生科研创新项目(CYS16223)资助
** 通讯作者: 刘贞, 主要研究方向为可再生能源发展战略及规划。E-mail: zhenliu@tsinghua.edu.cn
朱开伟, 主要研究方向为可再生能源发展战略及规划。E-mail: kaiwei_zhu@foxmail.com
收稿日期: 2016-07-30 接受日期: 2016-11-23
* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (71573026) and the Graduate Student Research Innovation Project of Chongqing (CYS16223).
** Corresponding author, E-mail: zhenliu@tsinghua.edu.cn
Received Jul. 30, 2016; accepted Nov. 23, 2016

Therefore, it is important for the development of ecological agriculture and the sustainable use of agricultural biomass to evaluate ecological potential of crop residues in terms of energy utilization and protection of soil functions. To this end, this study first advanced a concept of Ecological Straw Returning Amount with the consideration of soil and water conservation, soil organic matter maintaining and crop yield increase. Then a scenario analysis method was used to design optimal ecological straw return of different crops. Three scenarios (low, medium and high return) were designed for each crop residue return. The ecological potential of straw energy use was not only affected by ecological straw return, but influenced by crop planting area, per-unit crop yield, crop planting structure and other crop residue uses such as industrial and agricultural uses. Therefore a bottom up dynamic analysis model that was coupled with Gray Neural Network and linear regression analysis was built to calculate ecological potential of straw energy utilization in different regions of China. Ecological potential of energy-oriented utilization of crop residues of different regions was evaluated from three aspects — spatial distribution, resource density and residual resource components. Then based on the direct straw-fired power generation and cellulosic ethanol project, some recommendations were put forward for the development of crop residue energy utilization. The study revealed that: 1) In low, medium and high scenario conditions, ecological potentials of straw in terms of energy utilization were respectively 2.28×10^8 tons, 1.37×10^8 tons and 7.76×10^7 tons, with crop residual densities of 172 t·km^{-2}, 103 t·km^{-2} and 58 t·km^{-2}. Available ecological straw resource for the production of bio-energy comprised mainly of paddy straw, potato straw and wheat straw under low and medium scenario conditions, and mainly of potato straw and sugar straw under high scenario condition. The resource was mainly distributed in Henan, Shandong, Heilongjiang and Sichuan Provinces under the three scenario conditions. 2) Under low scenario condition, residue resource density and total amount of straw in the provinces in mainland China (with the exception of Beijing, Tianjin, Shanghai and Tibet) met the requirement for 6 MW direct straw-fired power generation that was the equivalent of an annual output of 10 000 tons of cellulosic ethanol. Under the medium scenario, only the crop straw resources of Fujian, Guangdong, Guangxi, Hainan and Chongqing were suitable for an annual output of 50 000 tons of cellulosic ethanol. A 25 MW direct straw-fired power generation or an annual output of 50 000 tons of cellulosic ethanol was possible for Fujian, Guangdong, Guangxi, Hainan and Chongqing under the high scenario condition.
Keywords: Ecological Straw Return Amount; Straw energy utilization; Biomass energy; Crop residual resource; Ecological potential

作为农业大国，中国农作物秸秆量巨大，农业生物质能丰富。对农业生物质能资源进行科学有效的评估，是实现农业生物质能开发利用的重要前提和基础。目前，较为基础的测算方法是运用 GIS 对不同农作物种植面积进行测算，然后考虑农作物单产、草谷比和可采集率，对生物质能资源进行综合评价。如 Liu 等[1]考虑作物产量、土地变更和温室气体排放等因素，计算出加拿大农业生物质能潜力约为 3 730 万 t; Lourinho 等[2]采用 GIS 软件测算出农林生物质剩余有效收集空间范围，认为 Alto Alentejo 地区可利用总量为 40 000 t·a^{-1}；郑雄等[3]考虑草谷比和折标系数，测算出南宁市水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、花生(*Arachis hypogaea*)等 7 种农作物秸秆的可能源化潜力约 330 万 t；邢红等[4]利用草谷比、收集系数、折标系数、副产物系数，估算南通市每年秸秆、农业加工副产品等农业生物质能总量约为 105 万 t。

同时，也有部分学者考虑农作物剩余的还田、饲料、工业、燃料等用途，对生物质可采集利用潜力进行评价。在还田量计算方面，绝大多数是采用还田比进行计算，未考虑土壤生态要求对不同农作物秸秆保留量的影响。如：Roberts 等[5]考虑作物种类、种植面积、单产等因素，测算出 General Pueyrredon 地区农业生物质潜力约为 20.5 万 t；Chandra 等[6]考虑农作物产量、农作物剩余收集率和用途等因素，测算 2003—2012 年斐济农业生物质能潜力约为 72.67 PJ；田宜水等[7]考虑不同农作物草谷比和农作物剩余的燃料、肥料、饲料及工业等用途，测算出我国主要农作物秸秆可能源化总量约 3.44 亿 t；米锋等[8]考虑不同农作物产量、草谷比和秸秆收集系数，测算出通辽地区农作物秸秆理论量为 601.73 万 t，可收集量为 567.52 万 t。

然而，不同农作物秸秆构成及还田方式存在一定差异，使得还田后对防止水土流失，维护土壤有机质等产生差异。因此在计算秸秆还田量时，不能单一采用还田比进行计算。基于此，本研究考虑土壤功能需求，从防止水土流失、维护土壤有机质和作物长期产量的角度，提出了土壤生态保留量的概念。此外，随着时间的推移，农作物播种面积、单产以及种植结构会发生变化，从而对可能源化秸秆资源潜力和分布空间造成影响。而现有相关研究鲜有从农作物播种面积、单产以及种植结构变化角度，对未来可能源化秸秆资源潜力进行评价。基于此，本研究拟在上述研究的基础上，考虑不同农作物的

土壤生态保留量，以及播种面积、单产和种植结构的变化，构建自下而上的可能源化秸秆资源生态潜力动态评价模型，并运用该模型评价分析中国不同区域主要农作物可能源化秸秆资源的生态潜力。研究结果不仅为中国可再生能源区域目标分解，秸秆能源化产业布局及规划提供了决策依据，同时对我国生态农业的发展也有着重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 计算方法

假设第 t 年全国农作物播种总面积为 S_t，则第 i 省份的播种面积可以表示为：$S_{t,i}=S_t\times\alpha_{t,i}$，其中 $\alpha_{t,i}$ 表示第 t 年第 i 省份农作物播种面积占全国农作物播种总面积的比例；若有 m 种主要农作物，则第 t 年第 i 省份第 j 种农作物的秸秆产量($P_{t,i,j}$)可以表示为：

$$P_{t,i,j}=S_{t,i}\times\beta_{t,i,j}\times\gamma_{t,i,j}\times\delta_j \quad (1)$$

式中：$\beta_{t,i,j}$ 表示第 t 年第 i 省份第 j 种农作物的种植比例，$\gamma_{t,i,j}$ 表示第 t 年第 i 省份第 j 种农作物的单位产量，δ_j 表示第 j 种农作物的草谷比。则第 t 年第 i 省份的农作物秸秆总量($P_{t,i}$)可以表示为：

$$P_{t,i}=\sum_{j=1}^{m}P_{t,i,j}=\sum_{j=1}^{m}S_{t,i}\times\beta_{t,i,j}\times\gamma_{t,i,j}\times\delta_j \quad (2)$$

除去秸秆还田外，目前秸秆主要用途可以分为 3 大类：农业用途、工业用途和农村生活用能[9-10]。则第 t 年第 i 省份主要农作物可能源化秸秆总量($P_{t,i}^{*}$)可以表示为：

$$P_{t,i}^{*}=\sum_{j=1}^{m}\begin{pmatrix}S_{t,i}\times\beta_{t,i,j}\times\gamma_{t,i,j}\times\delta_j-\varepsilon_{t,i,j}\\-\theta_{t,i,j}-\varphi_{t,i,j}-\mu_{t,i,j}\end{pmatrix} \quad (3)$$

式中：$\varepsilon_{t,i,j}$、$\theta_{t,i,j}$、$\varphi_{t,i,j}$ 和 $\mu_{t,i,j}$ 分别表示第 t 年第 i 省份第 j 种农作物的土壤生态保留量、农业用量、工业用量和农村生活用量。则第 t 年可能源化秸秆生态总量(P_t)可以表示为：

$$P_t=\sum_{i=1}^{31}\left[\sum_{j=1}^{m}\begin{pmatrix}S_{t,i}\times\beta_{t,i,j}\times\gamma_{t,i,j}\times\delta_j-\varepsilon_{t,i,j}\\-\theta_{t,i,j}-\varphi_{t,i,j}-\mu_{t,i,j}\end{pmatrix}\right] \quad (4)$$

式中：31 表示大陆省份数量，暂未考虑港澳台地区。

1.2 数据材料设置

1.2.1 数据来源

文中全国和各省市农作物播种面积、各省市农作物单产，以及各省市主要农作物播种面积的样本数据均来自于国家数据农业数据库[11]，同类指标的统计口径均一致。

1.2.2 各省农作物播种面积预测

农作物播种面积受经济发展、政策、农业基础设施水平等因素的影响，而这些因素均具有不确定性，使得播种面积呈非线性变化；同时中短期预测的样本量较小，故采用灰色神经网络对全国农作物播种总面积进行预测。首先，依据 1995—2004 年农作物播种总面积的样本值分别构建序列长度为 6、8 和 10 的 GM(1, 1)模型，并采用等维滚动法预测 2005—2014 年农作物播种总面积。其次，将 3 个 GM (1, 1)模型的预测结果作为神经网络的输入值，2005—2014 年农作物播种总面积的样本值作为输出值，构建 BP 神经网络，各层传递函数均为 Sigmoid 函数，最终预测值和实际值的拟合结果如图 1 所示。其中，2016 年、2020 年、2025 年和 2030 年播种总面积分别为 1.672×10^8 hm^2、1.709×10^8 hm^2、1.711×10^8 hm^2 和 1.711×10^8 hm^2。

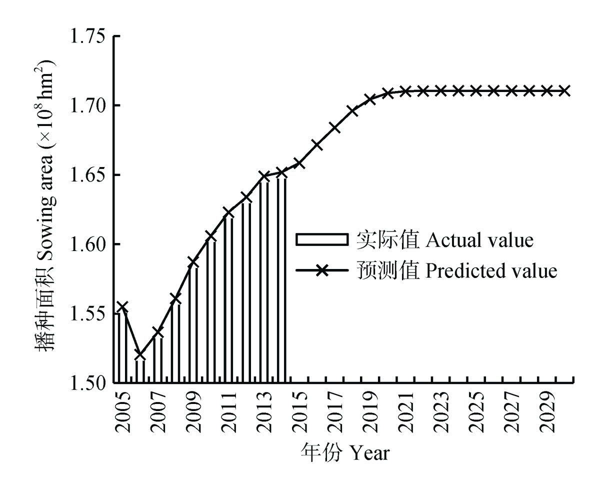


图 1 中国农作物播种总面积预测

Fig. 1 Total crop sowing area forecasting in China

各省市农作物播种面积占比预测则采用线性回归法，从 2000—2012 年各省市农作物播种面积占比的回归系数来看，天津、河北、内蒙古等 14 个省市农作物播种面积占比与时间呈高度的线性相关关系($R^2>0.8$)；北京、山西、吉林等 11 个省市农作物播种面积占全国总播种面积的比例与时间有着较强的相关关系($0.5<R^2<0.8$)，而辽宁、江西、湖北等 6 省线性相关关系不明显($R^2<0.5$)。因此，分别取 2000—2012 年辽宁、江西、湖北、湖南、海南、贵州农业播种面积占比的均值作为预测值。最后，进行归一化处理，结合未来全国农作物播种面积，则各省市未来农业播种面积如图 2 所示。

1.2.3 主要农作物的选取及种植比例设计

我国农作物种类繁多，粮食作物以稻谷(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、薯类(主要为马铃薯, *Solanum tuberosum*)、大豆(*Glycine max*)等为主；经济作物中油菜(*Brassica campestris*)、花生(*Arachis hypogaea*)、棉花(*Gossypium arboreum*)和甘蔗(*Saccharum officinarum*)的种植区域相对集中，

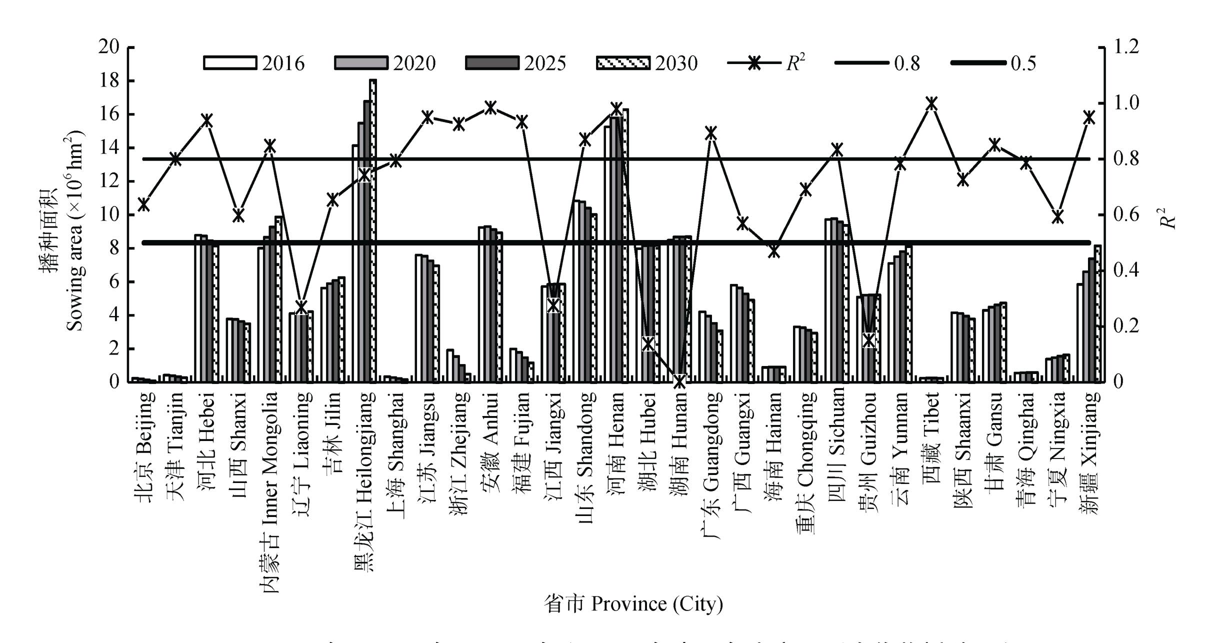


图 2　2016 年、2020 年、2025 年和 2030 年中国各省市预测农作物播种面积

Fig. 2　Forecasted crop sowing area of each province of China in 2016, 2020, 2025 and 2030

秸秆可规模化利用, 故选上述 9 种作物作为研究对象。从 2000—2012 年 9 种农作物播种比例来看[11], 稻谷、小麦、棉花、花生、油菜和甘蔗的种植比例分别在 23.5%~24.5%、19.5%~20.5%、3.5%~5.0%、3.5%~4.5%、5.0%~6.0%、1.0%~1.5%内小幅度波动; 从各省市来看, 部分省市的某种农作物种植比例会发生变化, 但大多数省市主要农作物的种植比例变动不大。因此, 取各省市 2000—2012 年主要农作物种植比例的均值作为预测值, 如图 3 所示。

1.2.4　主要农作物单产设计

单一采用数学模型对农作物单产进行预测, 会出现预测值与现实不符的现象。同时相关研究较少, 为确保预测的有效性, 采用模型预测和专家预测相结合的方法。首先, 根据各省市 2000—2012 年主要农作物单产, 采用线性回归方法进行预测; 然后, 请相关领域专家独立对各省市 2020 年和 2030 年主要农作物的单产进行评估。若线性回归预测值小于专家预测值, 则取线性回归预测值作为结果; 反之, 则取专家预测值, 并采用加权平均法计算其余年份的单产。最终, 各省市主要农作物 2020 年和 2030 年的单产如表 1 所示(薯类单产均为折粮后单产, 折合比 5∶1)。

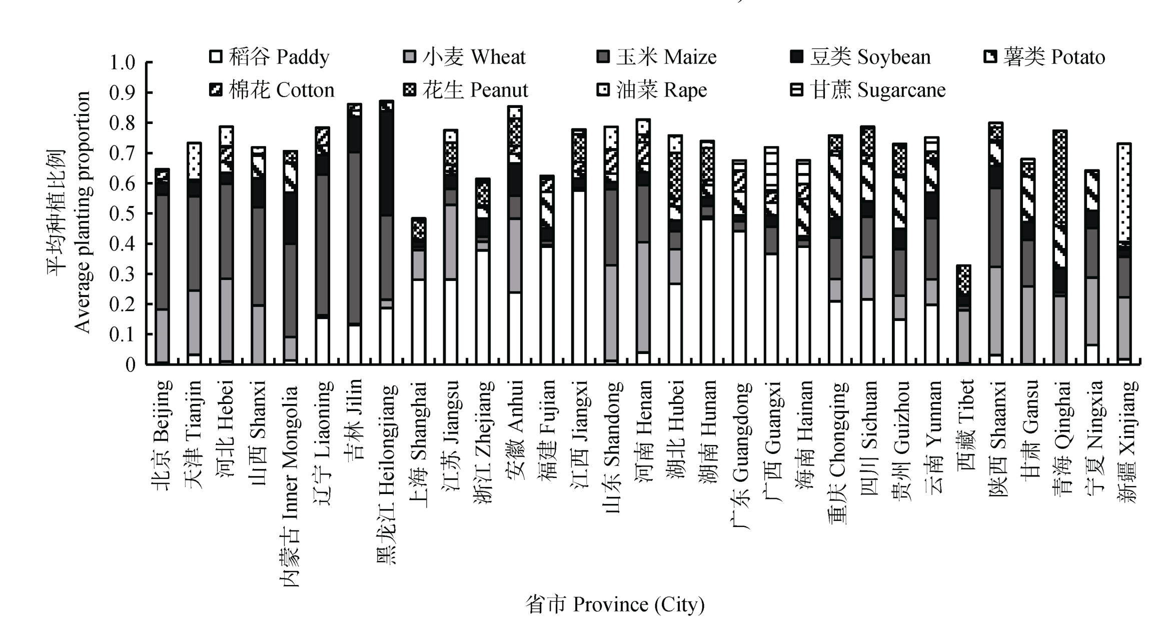


图 3　中国 2000—2012 年各省市主要农作物平均种植比例

Fig. 3　Average planting proportions of main crops from 2000 to 2012 by province in China

表 1 2020 年和 2030 年中国各省份主要农作物单产量

Table 1 Yields of main crops in 2020 and 2030 by province in China

kg·hm^{-2}

省(市) Province (City)	稻谷 Paddy		小麦 Wheat		玉米 Maize		豆类 Soybean		薯类 Potato		棉花 Cotton		花生 Peanut		油菜 Rape		甘蔗 Sugarcane	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
北京 Beijing	6 431	6 499	5 100	5 150	7 500	8 000	1 895	1 930	6 146	6 329	1 253	1 334	3 000	3 000	0	0	0	0
天津 Tianjin	7 500	7 733	5 164	5 453	6 392	6 484	1 400	1 567	5 168	5 525	1 300	1 300	3 300	3 400	0	0	0	0
河北 Hebei	7 200	7 467	6 078	6 927	6 414	7 500	1 900	1 933	4 782	5 454	1 000	1 033	3 500	3 533	1 805	2 000	0	0
山西 Shanxi	5 500	5 833	3 974	4 525	5 707	6 244	1 000	1 000	2 000	2 167	1 200	1 233	2 200	2 233	1 434	1 714	0	0
内蒙古 Inner Mongolia	7 400	7 600	3 659	4 142	6 986	7 928	1 500	1 567	2 900	2 967	1 500	1 500	1 800	1 867	1 163	1 254	0	0
辽宁 Liaoning	7 600	7 700	5 000	5 500	6 889	7 635	2 500	2 533	6 500	6 667	1 500	1 533	2 900	2 967	2 215	2 500	0	0
吉林 Jilin	7 800	8 033	4 430	5 470	8 000	8 500	2 500	2 633	7 000	7 167	1 700	1 700	3 000	3 067	0	0	0	0
黑龙江 Heilongjiang	6 800	6 900	5 000	5 500	6 395	7 620	1 600	1 667	5 000	5 233	0	0	2 500	2 600	2 500	3 000	0	0
上海 Shanghai	8 300	8 400	4 100	4 167	6 800	7 000	2 900	2 967	8 100	8 233	1 900	1 967	3 200	3 300	2 352	2 536	65 000	66 000
江苏 Jiangsu	8 300	8 400	5 824	6 000	5 800	6 000	2 600	2 633	6 600	6 667	1 100	1 133	3 700	3 767	2 500	3 000	60 000	61 000
浙江 Zhejiang	7 100	7 200	4 585	5 428	5 024	5 559	2 500	2 533	5 000	5 133	1 400	1 433	2 900	2 933	2 300	2 500	62 000	62 667
安徽 Anhui	6 300	6 367	6 967	8 500	4 600	4 667	1 250	1 250	3 000	3 000	900	967	4 200	4 267	2 517	2 956	40 000	40 667
福建 Fujian	6 000	6 083	3 000	3 500	4 657	5 513	2 300	2 367	4 800	4 867	850	850	2 500	2 567	1 604	1 851	63 000	63 667
江西 Jiangxi	6 000	6 067	2 420	2 914	5 580	6 500	1 800	1 867	4 400	4 467	1 700	1 767	2 700	2 767	1 542	1 916	47 000	47 667
山东 Shandong	8 400	8 467	6 995	8 000	7 322	8 094	2 600	2 667	7 800	7 867	1 100	1 100	4 400	4 433	2 300	2 500	0	0
河南 Henan	7 500	7 567	7 177	8 477	6 623	7 649	1 800	1 867	4 800	4 867	1 100	1 100	4 100	4 133	2 300	2 500	65 000	66 667
湖北 Hubei	8 000	8 067	4 181	4 991	5 000	5 500	2 200	2 233	4 000	4 067	1 100	1 100	3 600	3 633	2 375	2 500	46 000	47 333
湖南 Hunan	6 400	6 433	2 989	3 574	7 062	8 500	2 300	2 300	4 800	4 900	1 500	1 500	2 500	2 533	1 666	1 834	53 000	53 667
广东 Guangdong	5 700	5 767	3 122	3 297	5 183	5 824	2 400	2 400	5 200	5 300	0	0	2 700	2 733	1 342	1 446	87 000	88 000
广西 Guangxi	5 400	5 467	1 500	2 000	5 520	6 500	1 600	1 633	2 800	2 867	1 100	1 100	2 600	2 667	1 067	1 161	73 000	73 667
海南 Hainan	4 600	4 667	0	0	5 546	6 854	2 700	2 800	3 800	3 867	0	0	2 500	2 567	0	0	63 000	63 667
重庆 Chongqing	7 500	7 600	3 000	3 500	6 000	6 500	2 000	2 067	4 000	4 000	800	800	2 000	2 000	2 227	2 500	39 000	39 000
四川 Sichuan	7 500	7 600	3 706	3 976	5 730	6 513	2 300	2 300	4 100	4 100	1 000	1 000	2 400	2 433	2 500	2 800	50 000	50 000
贵州 Guizhou	6 500	6 533	2 079	2 276	4 926	5 029	1 100	1 100	2 600	2 633	800	800	2 000	2 000	1 600	1 600	41 000	41 667
云南 Yunnan	6 100	6 133	2 300	2 500	4 540	4 874	2 000	2 067	3 000	3 100	1 700	1 767	1 500	1 500	1 800	1 867	60 000	60 667
西藏 Tibet	6 000	6 033	7 174	7 718	7 000	7 500	3 800	3 800	6 000	6 100	0	0	2 300	2 367	2 700	2 700	0	0
陕西 Shaanxi	6 800	6 900	4 279	4 979	5 431	6 361	2 000	2 067	2 600	2 667	1 400	1 433	3 000	3 067	2 000	2 067	32 000	32 667
甘肃 Gansu	7 500	7 667	3 323	3 500	5 579	6 142	1 800	1 867	3 500	3 533	1 800	1 800	3 000	3 167	2 000	2 000	0	0
青海 Qinghai	0	0	4 593	5 286	8 000	8 500	2 500	2 567	4 300	4 367	0	0	0	0	2 200	2 267	0	0
宁夏 Ningxia	8 500	8 600	3 981	4 713	8 500	9 000	1 300	1 367	2 200	2 300	0	0	2 000	2 000	2 000	2 167	0	0
新疆 Xinjiang	8 400	8 467	5 970	6 456	8 000	8 500	3 500	3 600	5 700	5 800	2 200	2 300	4 000	4 167	2 200	2 300	0	0

1.2.5　土壤生态保留量设计

首先，在知网中分别对研究不同农作物秸秆还田量与水土流失、土壤有机质或土壤有机碳以及农作物产量关系的文献进行检索，并整理出相应的秸秆保留范围；再次，按照农作物种类对上述研究文献进行分类，分别计算出所对应农作物文献中秸秆保留范围上限值和下限值的均值，得到新的不同农作物秸秆的保留量范围，并将其视为土壤生态保留量的取值范围；最后，将土壤生态保留量的下限值设置为低情景值，上限值设置为高情景值，上下限的均值设置为中情景值。由于油菜、薯类、花生和甘蔗的相关研究文献较少，而油菜秸秆与小麦秸秆的主要成分及比例相近[17]，因此油菜的情景设置采用小麦的前景设置；薯类、花生和甘蔗的最小保留量则取其他农作物最小保留量的均值，具体如表 2 所示。

1.2.6　草谷比及秸秆用途设计

我国棉花产量统计量为皮棉产量，因此参考文献[28]进行设计，其余农作物均参考文献[29-30]进行设计，具体如表 3 所示。在秸秆主要用途设计方面，为便于统计将作为工业原料的秸秆归为工业用比，如造纸、人工板、餐具等，但不包括能源化利用的秸秆；将用于饲料、肥料、菌类培植等农业生产活动的秸秆归为农业用比；将用于农村生活供能和供暖的秸秆归为农村生活用比。本文主要综合文献[31-33]对不同农作物秸秆的工业用比、农业用比和农村生活用比进行设计，具体如表 3 所示。

表 2　作物秸秆土壤生态保留量设计

Table 2　Design of ecological straw returning amounts of crops　　$t\cdot km^{-2}$

情景 Scenario	稻谷 Paddy	小麦 Wheat	玉米 Maize	豆类 Soybean	薯类 Potato	棉花 Cotton	花生 Peanut	油菜 Rape	甘蔗 Sugarcane
低 Low	1.45	1.31	3.25	1.26	1.70	1.61	1.70	1.31	1.70
中 Medium	2.71	2.21	4.09	2.36	2.67	2.43	2.67	2.21	2.67
高 High	3.97	3.11	4.92	3.45	3.64	3.25	3.64	3.11	3.64
参考文献 Reference	[18-19]	[20-21]	[22-24]	[25-26]	—	[27]	—	[17,20-21]	—

表 3　作物秸秆工业用比、农业用比、农村生活用比及草谷比设计

Table 3　Design of manufacture, agriculture, rural household using ratios and straw-grain ratio of crops

项目 Item	稻谷 Paddy	小麦 Wheat	玉米 Maize	豆类 Soybean	薯类 Potato	棉花 Cotton	花生 Peanut	油菜 Rape	甘蔗 Sugarcane
草谷比 Straw-grain ratio	1.00	1.17	1.04	1.5	0.61	5.00	1.14	2.87	0.25
工业用比 Manufacture using ratio	0.04	0.19	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0	0
农业用比 Agricultural using ratio	0.16	0.10	0.21	0.17	0.16	0.08	0.22	0.10	0.14
农村生活用比 Rural household using ratio	0.25	0.18	0.22	0.31	0.12	0.40	0.32	0.33	0.07

2　结果与分析

2.1　中国各省市可能源化秸秆资源生态潜力

在低情景、中情景和高情景中，2030 年主要农作物可能源化秸秆量分别为 22 796 万 t、13 718 万 t 和 7 756 万 t。低情景中，可能源化秸秆主要分布在河南、山东、黑龙江、四川和广西，2030 年分别约占总量的 10.64%、7.70%、6.36%、5.65%、5.57%，而北京、天津、山西、上海、浙江、福建、海南、西藏、青海、宁夏占比不足 1%。河北、吉林、安徽、江西、广东、云南分别约占总量的 3%~5%，其余省份介于 1%~3%。中情景中，则主要集中在河南、山东、四川、黑龙江和云南，2030 年分别约占总量的 11.16%、8.02%、7.63%、6.13%、5.69%，北京、天津、山西、上海、浙江、海南、西藏、陕西、青海、宁夏占比不足 1%，河北、安徽、湖南、广东、重庆分别约占总量的 3%~5%，其余省份介于 1%~3%。高情景中，则主要集中在广西、河南、山东、四川和黑龙江，2030 年分别约占可能源化秸秆总量的 10.54%、10.01%、8.93%、8.67%、7.15%、5.41%。北京、天津、山西、上海、浙江、西藏、陕西、青海、宁夏占比均小于 1%。河北、内蒙古、江苏、湖北、湖南、广东、重庆、甘肃、新疆占比均为 3%~5%，其余省份介于 1%~3%。不同情景下可能源化秸秆量及总量如表 4 所示。

2.2　中国各省市可能源化秸秆资源构成分析

不同土壤生态保留量情景下，可能源化秸秆资源的构成及其变化趋势如表 5 所示。低保留情景中，可能源化秸秆主要由稻谷、薯类和小麦秸秆构成，2016 年和 2030 年分别约占总量的 30.61%、30.18%、18.63%和 29.57%、29.88%、18.84%；在中保留情景中，同样主要由稻谷、小麦和薯类秸秆构成，2016 年和 2030 年分别约占总量的 22.20%、15.24%、43.07%和 22.21%、15.73%、42.64%；相比低保留情景和中

表 4 2016 年、2020 年、2025 年和 2030 年不同土壤生态保留量情景下中国各省市可能源化秸秆生态总量

Table 4 Available straw amounts for bioenergy in 2016, 2020, 2025 and 2030 under different scenarios of ecological straw returning amounts for each province in China ×10^4t

省(市) Province (City)	低情景 Low scenario				中情景 Medium scenario				高情景 High scenario			
	2016	2020	2025	2030	2016	2020	2025	2030	2016	2020	2025	2030
北京 Beijing	17	15	12	8	7	6	5	3	3	3	2	1
天津 Tianjin	27	26	23	20	11	11	10	9	1	1	2	2
河北 Hebei	844	866	868	868	497	519	531	540	217	238	258	276
山西 Shanxi	136	142	146	150	44	48	52	59	16	20	24	28
内蒙古 Inner Mongolia	481	535	592	651	293	322	352	382	202	224	247	270
辽宁 Liaoning	451	472	486	500	266	276	282	288	151	159	164	170
吉林 Jilin	674	728	779	831	267	286	314	348	154	167	180	192
黑龙江 Heilongjiang	1 015	1 128	1 269	1 449	607	680	759	841	298	336	377	420
上海 Shanghai	37	33	26	20	21	18	15	11	7	7	6	4
江苏 Jiangsu	1 244	1 246	1 214	1 180	716	720	705	689	254	259	257	254
浙江 Zhejiang	271	220	147	72	156	128	86	43	60	49	33	16
安徽 Anhui	1 065	1 088	1 088	1 086	473	490	498	505	97	99	99	99
福建 Fujian	368	333	278	222	238	216	182	146	169	153	128	102
江西 Jiangxi	779	805	816	826	327	342	351	360	108	112	115	118
山东 Shandong	1 842	1 847	1 802	1 754	1 151	1 155	1 129	1 101	710	716	705	692
河南 Henan	2 193	2 292	2 359	2 424	1 378	1 442	1 487	1 531	671	711	744	776
湖北 Hubei	1 113	1 149	1 163	1 177	644	666	677	687	294	308	318	328
湖南 Hunan	1 217	1 251	1 261	1 270	626	646	655	663	247	255	260	264
广东 Guangdong	843	798	718	635	558	531	480	426	437	414	373	330
广西 Guangxi	1 492	1 459	1 375	1 289	1 105	1 082	1 023	961	946	925	872	817
海南 Hainan	183	189	191	193	128	132	133	135	110	114	115	117
重庆 Chongqing	690	682	652	621	515	509	486	463	360	356	341	325
四川 Sichuan	1 610	1 623	1 596	1 567	1 069	1 079	1 063	1 046	681	690	682	673
贵州 Guizhou	514	529	534	538	331	341	346	350	179	186	189	193
云南 Yunnan	977	1 037	1 085	1 133	673	714	748	781	478	507	531	554
西藏 Tibet	15	15	15	15	10	10	10	10	5	5	5	5
陕西 Shaanxi	284	284	277	269	116	117	116	114	63	65	65	65
甘肃 Gansu	455	480	501	521	324	341	353	365	255	268	278	288
青海 Qinghai	75	78	80	82	53	55	56	58	43	45	46	47
宁夏 Ningxia	135	147	159	172	65	71	78	85	25	29	33	37
新疆 Xinjiang	836	963	1 105	1 252	458	534	623	718	157	194	241	292
合计 Total	21 882	22 457	22 619	22 796	13 125	13 487	13 605	13 718	7 398	7 614	7 688	7 756

表 5 2016 年、2020 年、2025 年和 2030 年不同土壤生态保留量情景下中国可能源化秸秆作物构成

Table 5 Crop composition of the energy utilized straw resource in 2016, 2020, 2025 and 2030 under different scenarios of ecological straw returning amounts in China %

情景 Scenario	年份 Year	稻谷 Paddy	小麦 Wheat	玉米 Maize	豆类 Soybean	薯类 Potato	棉花 Cotton	花生 Peanut	油菜 Rape	甘蔗 Sugarcane
低 Low	2016	30.61	18.63	3.00	1.08	30.18	2.15	0.38	5.78	8.19
	2020	30.35	18.71	3.21	1.11	30.13	2.15	0.40	6.03	7.91
	2025	29.99	18.79	3.57	1.16	30.03	2.15	0.41	6.35	7.55
	2030	29.57	18.84	4.06	1.24	29.88	2.14	0.42	6.66	7.18
中 Medium	2016	22.20	15.24	0.08	0.03	43.07	1.04	0.00	5.80	12.54
	2020	22.24	15.39	0.08	0.04	42.98	1.05	0.00	6.12	12.09
	2025	22.24	15.56	0.19	0.05	42.83	1.07	0.00	6.53	11.52
	2030	22.21	15.73	0.35	0.06	42.64	1.09	0.00	6.96	10.95
高 High	2016	4.28	7.32	0.00	0.00	63.53	0.46	0.00	4.14	20.26
	2020	4.48	7.57	0.00	0.00	63.41	0.50	0.00	4.53	19.51
	2025	4.74	7.89	0.00	0.00	63.22	0.54	0.00	5.04	18.57
	2030	4.98	8.20	0.00	0.00	63.02	0.58	0.00	5.59	17.63

保留情景, 高保留情景中可能源化秸秆主要是由薯类秸秆和甘蔗秸秆构成, 2016 年和 2030 年分别约占总量的 63.53%、20.26%和 63.22%、18.57%。

2.3　中国各省市可能源化秸秆资源密度分析

对企业而言, 在不同时间点不同农作物播种面积是不同的, 而区域耕地面积是相对不变的, 因此采用农作物播种面积计算秸秆资源密度。不同土壤生态保留量情景下, 不同地区可能源化秸秆资源密度如表 6 所示。在低情景中, 2030 年主要农作物可能源化秸秆资源密度约为 172 $t{\cdot}km^{-2}$。其中, 上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、广西、海南、重庆、四川和新疆密度较高, 均大于 200 $t{\cdot}km^{-2}$; 北京、河北、辽宁、吉林、安徽、江西、河南、湖北、湖南、贵州、云南、西藏、甘肃、青海和宁夏的资源密度介于 100~200 $t{\cdot}km^{-2}$; 其余省份秸秆资源密度均小于 100 $t{\cdot}km^{-2}$。在中情景下, 2030 年可能源化秸秆资源密度约 103 $t{\cdot}km^{-2}$, 仅广东、广西、海南和重庆的秸秆资源密度大于 200 $t{\cdot}km^{-2}$; 上海、江苏、浙江、福建、山东、河南、湖北、湖南、四川、云南、西藏、甘肃、青海和新疆秸

表 6　2016 年、2020 年、2025 年和 2030 年不同土壤生态保留量情景下中国各省市秸秆资源密度

Table 6　Densities of energy utilized straw resource in different provinces (cities) in 2016, 2020, 2025 and 2030 under different scenarios of ecological straw returning amounts in China

$t{\cdot}km^{-2}$

省(市) Province (City)	低情景 Low scenario				中情景 Medium scenario				高情景 High scenario			
	2016	2020	2025	2030	2016	2020	2025	2030	2016	2020	2025	2030
北京 Beijing	109	112	116	120	47	48	50	51	19	19	20	21
天津 Tianjin	87	89	92	96	35	37	39	41	3	4	6	8
河北 Hebei	122	126	130	135	72	75	80	84	31	35	39	43
山西 Shanxi	50	53	56	59	16	18	20	23	6	7	9	11
内蒙古 Inner Mongolia	85	87	90	93	52	53	54	55	36	37	38	39
辽宁 Liaoning	140	143	147	151	82	84	85	87	47	48	50	51
吉林 Jilin	139	143	149	154	55	56	60	65	32	33	34	36
黑龙江 Heilongjiang	82	84	87	92	49	50	52	53	24	25	26	27
上海 Shanghai	227	228	231	233	128	130	132	134	46	48	49	51
江苏 Jiangsu	211	213	216	218	121	123	125	127	43	44	46	47
浙江 Zhejiang	229	231	234	237	132	134	137	140	51	51	52	53
安徽 Anhui	135	137	139	142	60	62	64	66	12	12	13	13
福建 Fujian	296	298	301	304	191	194	196	199	136	137	139	140
江西 Jiangxi	175	177	179	181	73	75	77	79	24	25	25	26
山东 Shandong	216	218	220	223	135	136	138	140	83	85	86	88
河南 Henan	177	179	181	183	111	113	114	116	54	56	57	59
湖北 Hubei	184	185	188	190	106	108	109	111	49	50	51	53
湖南 Hunan	194	195	196	197	100	101	102	103	39	40	40	41
广东 Guangdong	296	299	302	305	196	199	202	204	154	155	157	158
广西 Guangxi	357	359	362	365	265	267	269	272	226	228	230	231
海南 Hainan	305	307	311	314	213	215	217	219	184	186	188	190
重庆 Chongqing	274	275	277	278	205	205	206	207	143	144	144	145
四川 Sichuan	210	211	212	212	140	140	141	142	89	90	90	91
贵州 Guizhou	138	139	140	141	89	90	91	92	48	49	50	51
云南 Yunnan	183	184	185	186	126	127	127	128	90	90	90	91
西藏 Tibet	180	180	180	180	116	116	116	116	60	60	60	60
陕西 Shaanxi	85	86	87	89	35	36	37	38	19	20	21	21
甘肃 Gansu	155	157	159	162	111	112	112	113	87	88	89	89
青海 Qinghai	174	175	178	180	122	124	125	127	100	101	102	104
宁夏 Ningxia	151	155	159	163	72	75	78	81	28	30	33	35
新疆 Xinjiang	195	199	205	210	107	111	115	120	37	40	45	49
合计 Total	170	170	171	172	102	102	103	103	57	58	58	58

秆资源密度介于 100~200 t·km^{-2}，其余省份均小于 100 t·km^{-2}。高情景中，2030 年可能源化秸秆资源密度约 58 t·km^{-2}。其中，广西可能源化秸秆资源密度大于 200 t·km^{-2}，仅福建、广东、海南、重庆、青海秸秆资源密度介于 100~200 t·km^{-2}，其余省份均小于 100 t·km^{-2}。

3 讨论与结论

可能源化秸秆资源生态总量的计算主要是建立在土壤生态保留量、各省市农作物播种面积预测和农作物单产预测的基础之上。而土壤生态保留量是在文献[18-27]上进行设计的，具有客观性。在播种总面积预测方面，播种总面积将在 2024 年达到峰值 1.710 6×10^{8} hm^{2}，随后收敛稳定，小于文献[12]提出的最大播种面积；分省市来看，安徽、河南等省份的农作物播种面积与文献[13-14]的研究结果基本一致；在农作物单产预测方面，文献[15]预测到 2030 年我国稻谷、小麦、玉米、大豆、薯类和油菜单产分别约为 6 700 kg·hm^{-2}、6 500 kg·hm^{-2}、7 500 kg·hm^{-2}、2 300 kg·hm^{-2}、6 000 kg·hm^{-2} 和 2 200 kg·hm^{-2}；本文 2030 年全国稻谷、小麦、玉米、大豆和薯类的平均单产分别约为 6 847 kg·hm^{-2}、4 788 kg·hm^{-2}、6 871 kg·hm^{-2}、2 166 kg·hm^{-2}、4 716 kg·hm^{-2} 和 1 917 kg·hm^{-2}，除小麦和薯类单产偏小外，其余基本一致；棉花、甘蔗单产也基本与文献[16]的预测结果相一致。

在优先考虑土壤生态保留的前提下，低情景和中情景中，可能源化秸秆资源生态总量与采用还田比进行计算的研究结果相当[9,33]，而高情景中则明显小于现有研究。在可能源化秸秆资源生态总量区域分布上，低情景中可能源化秸秆资源主要分布区域与现有相关研究基本一致[9,33-35]，主要分布在河南、山东、黑龙江等地。然而随着时间的推移和土壤生态保留量的不断提高，在可能源化秸秆资源总量、资源构成以及资源空间分布上会与现有相关研究产生一定差异。随着时间的增加，可能源化秸秆资源会在空间上呈现集聚的现象。在低保留情景和中保留情景中，北京、天津、上海、江苏、浙江等经济发达地区的可能源化秸秆资源呈下降趋势，东北三省、内蒙古、新疆等地可能源化秸秆资源则逐年提高，而河南、山东、安徽、湖南、湖北、四川等地可能源化秸秆资源相对稳定。随着土壤生态保留量的提高，可能源化秸秆资源在空间分布和资源构成会发生转移。从资源空间转移来看，主要是向广西、云南、四川等地转移；资源构成上，主要是向薯类秸秆和甘蔗秸秆转移。

产生上述现象的主要原因在于，现有相关研究均采用还田比进行计算，最终总秸秆还田量是不同农作物秸秆还田量的加权平均值。而土壤生态保留量是针对不同农作物进行设计的，会出现某区域某种农作物秸秆还田量大于理论秸秆量。同时不同区域农作物播种面积、种植结构、农作物单产存在差异，从而使得可能源化秸秆生态资源在空间分布、资源密度和秸秆资源构成，会随着时间和土壤生态最小保留的改变而改变。同时秸秆能源化利用不仅与区域资源总量相关，还与秸秆资源密度、秸秆资源构成等密切相关。这些对我国秸秆能源化产业布局、战略规划、工艺流程以及农业生态环境的保护都有着重要的现实意义。

以直燃发电项目和燃料乙醇项目为例，相关研究表明若构建 6 MW 和 25 MW 的秸秆直燃发电厂，则分别要求区域秸秆密度达到 24 t·hm^{-2} 和 92 t·hm^{-2}；建立年产 1 万 t 和 5 万 t 的燃料乙醇企业，则需要分别达到 31 t·km^{-2} 和 153 t·km^{-2}[13]。若不考虑其他影响因素，低情景中除北京、天津、上海、西藏以外，其余省份均能构建 6 MW 的直燃发电厂或年产 1 万 t 的燃料乙醇企业。中情景中，仅江苏、浙江、福建、山东、河南、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南、甘肃和新疆适合规划建设 25 MW 秸秆直燃发电项目，年产 5 万 t 燃料乙醇项目仅适合规划在福建、广东、广西、海南和重庆。高情景中，北京、天津、山西、上海、安徽、西藏、陕西、青海、宁夏不适宜规划建设直燃发电项目或秸秆燃料乙醇项目；此外，仅福建、广东、广西、海南和重庆能建立 25 MW 直燃发电项目或年产量为 5 万 t 的燃料乙醇企业。

对于不同农作物秸秆而言，其物理化学属性会存在一定差异，从而对秸秆能源化的工艺流程产生影响，如对炉壁结垢的影响、发酵时对温度和酸碱度的影响。因此，区域内可能源化秸秆资源的构成会对秸秆能源化的工艺流程产生一定影响。总体来看，在低情景和中情景中，应优先考虑稻谷秸秆、薯类秸秆和小麦秸秆对秸秆能源化工艺流程的影响；在高情景中，应优先考虑薯类秸秆和甘蔗秸秆对工艺流程的影响。

通过上述分析讨论和研究结果，可得出以下结论：在低情景中，除北京、天津、上海和西藏因可能源化秸秆资源总量不足不能发展直燃发电项目和燃料乙醇项目外，其余省份均能发展直燃发电项目和燃料乙醇项目；同时应优先考虑稻谷秸秆、薯类秸

秆和小麦秸秆对秸秆能源化工艺流程的影响。中保留情景中，除北京、天津、山西、上海、西藏、青海和宁夏不能发展直燃发电项目和燃料乙醇项目外，其余省份均能发展。而年产 5 万 t 燃料乙醇项目仅适合规划在福建、广东、广西、海南和重庆。在高情景中，北京、天津、山西、上海、安徽、西藏、陕西、青海、宁夏不适宜规划建设直燃发电项目或秸秆燃料乙醇项目，仅福建、广东、广西、海南和重庆可规划 25 MW 直燃发电项目或年产 5 万 t 的燃料乙醇项目；同时，应优先考虑薯类秸秆和甘蔗秸秆对秸秆能源化工艺流程的影响。

参考文献 References

[1] Liu T T, McConkey B, Huffman T, et al. Potential and impacts of renewable energy production from agricultural biomass in Canada[J]. Applied Energy, 2014, 130: 222–229

[2] Lourinho G, Brito P. Assessment of biomass energy potential in a region of Portugal (Alto Alentejo)[J]. Energy, 2015, 81: 189–201

[3] 郑雄，何俊贺，冼萍，等．南宁市农业生物质资源存量估算与评价[J]．南方农业学报, 2013, 44(4): 697–700
Zheng X, He J H, Xian P, et al. Stock estimation and evaluation of agricultural biomass resources in Nanning City[J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(4): 697–700

[4] 邢红，赵媛，王宜强．江苏省南通市农村生物质能资源潜力估算及地区分布[J]．生态学报, 2015, 35(10): 3480–3489
Xing H, Zhao Y, Wang Y Q. Estimate and distribution of rural biomass resource potential in Nantong City, Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10): 3480–3489

[5] Roberts J J, Cassula A M, Prado P O, et al. Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 568–583

[6] Chandra VV, Hemstock S L. A biomass energy flow chart for Fiji[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 72: 117–122

[7] 田宜水，赵立欣，孟海波，等．中国农村生物质能利用技术和经济评价[J]．农业工程学报, 2011, 27(S1): 1–5
Tian Y S, Zhao L X, Meng H B, et al. Technical-economic assessment on rural bio-energy utilization technologies in China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S1): 1–5

[8] 米锋，潘文婧，陈凯，等．内蒙古通辽地区农业生物质资源开发利用及其经济效益分析[J]．干旱区资源与环境，2013, 27(9): 44–49
Mi F, Pan W J, Chen K, et al. The agricultural biomass resources exploitation and the economic benefit in Tongliao, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 44–49

[9] 王亚静，毕于运，高春雨．中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]．中国农业科学, 2010, 43(9): 1852–1859
Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1852–1859

[10] 包建财，郁继华，冯致，等．西部七省区作物秸秆资源分布及利用现状[J]．应用生态学报, 2014, 25(1): 181–187
Bao J C, Yu J H, Feng Z, et al. Situation of distribution and utilization of crop straw resources in seven western provinces, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 181–187

[11] 中华人民共和国国家统计局．农业年度数据[DB/OL]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01
The National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Agricultural annual data[DB/OL]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01

[12] 梁书民．我国各地区复种发展潜力与复种行为研究[J]．农业经济问题, 2007, 28(5): 85–90
Liang S M. Probing potentials of multiple cropping in the selected provinces in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2007, 28(5): 85–90

[13] 张杰，卢李朋，姜朋辉，等．安徽省粮食生产的主成分分析及其趋势预测[J]．长江流域资源与环境，2013, 22(3): 314–321
Zhang J, Lu L P, Jiang P H, et al. Principal component analysis and trend forecasts of grain production in Anhui Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(3): 314–321

[14] 张志国，杨贵玲．近 30 年河南省农作物播种面积的时序特征及趋势预测[J]．贵州农业科学, 2012, 40(10): 218–221
Zhang Z G, Yang G L. Sequential characters and trend prediction in sown area of crops from 1978 to 2008 in Henan Province[J]. Guizhou Agricultural Science, 2012, 40(10): 218–221

[15] 蔡承智，梁颖，李啸浪．基于 AEZ 模型预测的我国未来粮食安全分析[J]．农业科技通讯, 2008(2): 15–17
Cai C Z, Liang Y, Li X L. The analysis of future food security situation with AEZ model[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2008(2): 15–17

[16] 高明杰．基于农业综合生产能力需求的耕地资源安全阈值研究[D]．北京：中国农业科学院, 2008
Gao M J. Safety threshold of arable land based on demand of agricultural comprehensive production capacity[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2008

[17] 赵蒙蒙，姜曼，周祚万．几种农作物秸秆的成分分析[J]．材料导报, 2011, 25(8): 122–125
Zhao M M, Jiang M, Zhou Z W. The components analysis of several kinds of agricultural residues[J]. Materials Review, 2011, 25(8): 122–125

[18] 逯非，王效科，韩冰，等．稻田秸秆还田：土壤固碳与甲烷增排[J]．应用生态学报, 2010, 21(1): 99–108
Lu F, Wang X K, Han B, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 99–108

[19] 强学彩，袁红莉，高旺盛．秸秆还田量对土壤 CO_2 释放和土壤微生物量的影响[J]．应用生态学报，2004, 15(3): 469–472
Qiang X C, Yuan H L, Gao W S. Effect of crop-residue incorporation on soil CO_2 emission and soil microbial bio-

mass[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 469–472

[20] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 215–222
Xu J L, Hu N J, Zhu L Q. Effect of amount of annual straw returning on soil nutrients and yield in winter wheat field[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(2): 215–222

[21] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192–2199
Han X Z, Zhu L Q, Yang M F, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2192–2199

[22] 闫一凡, 王洪亮, 吴大付, 等. 玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 河南科技学院学报, 2012, 40(2): 14–17
Yan Y F, Wang H L, Wu D F, et al. Effect of maize straw returning on soil fertility[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 2012, 40(2): 14–17

[23] 朱玉芹, 岳玉兰. 玉米秸秆还田培肥地力研究综述[J]. 玉米科学, 2004, 12(3): 106–108
Zhu Y Q, Yue Y L. Summarize on fertilizing soil by returning maize straw to in field[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(3): 106–108

[24] 宫亮, 孙文涛, 王聪翔, 等. 玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 122–124
Gong L, Sun W T, Wang C X, et al. Effects of application maize straw on soil physical characteristics and yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(2): 122–124

[25] 孟庆英, 张春峰, 张娣, 等. 秸秆还田方式对土壤酶及大豆产量的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 642–647
Meng Q Y, Zhang C F, Zhang D, et al. Effects of straw returning patterns on soil enzyme activities and yield of soybean[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3): 642–647

[26] 刘贞, 吕指臣, 朱开伟, 等. 基于维护土壤功能的大豆秸秆生物质能开发潜力分析：以黑龙江省为例[J]. 重庆理工大学学报：社会科学, 2015, 29(1): 30–36
Liu Z, Lü Z C, Zhu K W, et al. Analysis of biomass energy development potential of soybean straw based on soil function maintenance: Take Heilongjiang Province as an example[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Social Science, 2015, 29(1): 30–36

[27] Yang G Z, Zhou X B, Li C F, et al. Cotton stubble mulching helps in the yield improvement of subsequent winter canola (*Brassica napus*L.) crop[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 50: 190–196

[28] 左旭, 毕于运, 王红彦, 等. 中国棉秆资源量估算及其自然适宜性评价[J]. 中国人口 资源与环境, 2015, 25(6): 159–166
Zuo X, Bi Y Y, Wang H Y, et al. Estimation and suitability evaluation of cotton stalk resources in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(6): 159–166

[29] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1–8
Xie G H, Han D Q, Wang X Y, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 1–8

[30] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 9–17
Xie G H, Wang X Y, Han D Q, et al. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 9–17

[31] 张希良, 高虎. 可再生能源规划原理方法工具与案例[R]. 重庆: 重庆理工大学, 2010
Zhang X L, Gao H. Renewable energy planning method, tools and case[R]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2010

[32] 黄季焜, 仇焕广. 我国生物燃料乙醇发展的社会经济影响及发展战略与对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010
Huang J K, Qiu H G. The Study of Bio-fuel Ethanol Development's Influence on Socio-Economic and Development Strategy and Countermeasures Research[M]. Beijing: Science Press, 2010

[33] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1637–1646
Cai Y Q, Qiu H G, Xu Z G. Evaluation on potentials of energy utilization of crop residual resources in different regions of China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(10): 1637–1646

[34] 朱开伟, 刘贞, 吕指臣, 等. 中国主要农作物生物质能生态潜力及时空分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4285–4301
Zhu K W, Liu Z, Lü Z C, et al. The ecological development potential and time-space analysis of Chinese main agricultural crop biomass energy[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(21): 4285–4301

[35] 张亚平, 孙克勤, 左玉辉. 中国发展能源农业的效益评价与区域分析[J]. 资源科学, 2009, 31(12): 2080–2085
Zhang Y P, Sun K Q, Zuo Y H. A benefit evaluation and regional analysis of energy agriculture development in China[J]. Resources Science, 2009, 31(12): 2080–2085